



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**NEPŘÍMÁ ANALÝZA VIBRACÍ POMOCÍ MIKROFONU
MOBILNÍHO TELEFONU**

INDIRECT VIBRATION ANALYSIS USING A MOBILE PHONE MICROPHONE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zuzana Plodková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka: **Zuzana Plodková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Daniel Zuth, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Nepřímá analýza vibrací pomocí mikrofonu mobilního telefonu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat možností využití signálu z mikrofonu mobilního telefonu pro analýzu vibrací. Kromě rešeršní části bude práce obsahovat i praktickou ukázkou zpracování a vyhodnocení naměřených dat. Výsledky budou porovnány s měřicí technikou používanou v praxi.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v oblasti mikrofونů (principy a použití).
Popis mikrofونů a filtrů používaných v mobilních telefonech.
Popis dostupného SW pro sběr dat z mikrofону.
Provést opakované měření.
Vyhodnocení měření.
Porovnání s ostatní měřicí technikou.

Seznam doporučené literatury:

BLATA, Jan a Janusz JURASZEK, 2013. Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2997-5.

CHUDÝ, Vladimír, Rudolf PALENČÁR, Eva KUREKOVÁ a Martin HALAJ, 1999. Meranie technických veličín. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 8022712752.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce řeší možnost využití signálu zaznamenaného mobilním telefonem pro analýzu vibrací. Povaha práce je z první poloviny rešeršní a je věnována obecně mikrofonom, mikrofonom v mobilních telefonech a technické diagnostice. Kapitola o mikrofonech rozebírá princip jejich fungování, dále nejdůležitější technické parametry a nakonec rozdělení mikrofونů podle jejich konstrukce. V případě mikrofونů v mobilních telefonech je zde zmíněn nejčastěji využívaný typ mikrofону pro mobilní telefony a jeho struktura včetně popisu možné filtrace zvuku. V kapitole o technické diagnostice jsou zmíněny možné způsoby a přístupy ke zpracování naměřeného signálu. Druhá část bakalářské práce je věnována opakovanému měření a následnému zpracování naměřených hodnot. Následuje zhodnocení účinnosti metody měření signálu mobilním telefonem pro analýzu vibrací porovnáním s výsledky získanými profesionální měřicí technikou.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the possibility of using a recorded signal from a mobile phone for vibration analysis. The first half of the thesis is a research generally dedicated to microphones, microphones in mobile phones and technical diagnostics. The chapter about microphones discusses the principle of their operation, further it analyzes the most important technical parameters and finally divides microphones according to their construction. In case of microphones in mobile phones there is mentioned the most commonly used type of microphone and its structure including a description of possible sound filtration. Possible ways and approaches to processing the measured signal are mention in the chapter about technical diagnostics. The second part of the thesis is devoted to repeated measurement and subsequent processing of measured values. An evaluation of efficiency of the method of measuring the signal with a mobile phone for vibration analysis by comparison with the results obtained by a professional measuring technique follows.

KLÍČOVÁ SLOVA

mikrofon, směrová charakteristika, MEMS mikrofon, technická diagnostika, vibrodiagnostika, akcelerometr, frekvenční analýza

KEYWORDS

microphone, directional characteristics, MEMS microphone, technical diagnostics, vibrodiagnostics, accelerometer, frequency analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PLODKOVÁ, Z. *Nepřímá analýza vibrací pomocí mikrofonu mobilního telefonu* [online]. Brno, 2019. [cit. 2019-05-23] Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Daniel Zuth Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji mému vedoucímu práce Ing. Danielu Zuthovi, Ph.D. za jeho čas a rady při zpracovávání bakalářské práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Daniela Zutha, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22. 5. 2019

.....

Plodková Zuzana

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MIKROFONY	17
2.1	Princip činnosti mikrofonu	17
2.2	Technické parametry mikrofonů	17
2.2.1	Citlivost mikrofonu	17
2.2.2	Šum mikrofonu	17
2.2.3	Impedance mikrofonu	17
2.2.4	Frekvenční charakteristika	17
2.2.5	Maximální SPL	18
2.2.6	Fantomové napájení	18
2.3	Směrová charakteristika	18
2.3.1	Kulová směrová charakteristika	19
2.3.2	Ledvinová směrová charakteristika	19
2.3.3	Kuželová směrová charakteristika	19
2.3.4	Osmičková směrová charakteristika	19
2.3.5	Superledvinová směrová charakteristika	19
2.4	Rozdělení mikrofonů podle konstrukce	20
2.4.1	Uhlíkový mikrofon	20
2.4.2	Elektrodynamický mikrofon	20
2.4.3	Piezoelektrický mikrofon	20
2.4.4	Elektromagnetický mikrofon	20
2.4.5	Elektrostatický kondenzátorový mikrofon	20
2.4.6	Elektretový mikrofon	21
3	MIKROFONY V MOBILNÍCH TELEFONECH	23
3.1	MEMS mikrofony	23
3.2	Struktura MCM	23
3.3	AKU143	24
3.4	Filtry v mobilních telefonech	25
4	TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	27
4.1	Vibrodiagnostika	27
4.1.1	Základní veličiny	28
4.2	Vliv poruch na základní veličiny	29
4.3	Snímače vibrací	29
4.3.1	Akcelerometry	29
4.4	Vyhodnocování vibrací	30
4.4.1	Vyhodnocování vibrací v časové oblasti	30
4.4.2	Analýza signálu ve frekvenční oblasti	30
5	MĚŘENÍ	33
5.1	Použitý SW	33
5.1.1	Signalexpress 2017	33
5.1.2	Hi-Res Audio Recorder	33
5.1.3	MATLAB	33
5.2	Průběh měření	34
5.3	Zpracování dat	34
5.3.1	Projev obrábění	34

5.3.2	Projev vyváženého a nevyváženého nástroje	35
6	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	39
7	ZÁVĚR.....	41
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43
9	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	45
9.1	Seznam zkratek a symbolů	45
9.2	Seznam tabulek.....	46
9.3	Seznam obrázků.....	46

1 ÚVOD

Cílem bakalářské práce je zjistit, zda je možné využívat signál z mikrofonu mobilního telefonu pro analýzu vibrací. Pro tento účel práce obsahuje řešerši v oblasti mikrofونů, dále informace o mikrofonech v mobilních telefonech a možné filtraci zvukového signálu a úvod do technické diagnostiky. Z těchto poznatků je následně čerpáno v praktické části bakalářské práce. Zde je pomocí záznamu zvuku mikrofونem mobilního telefonu a profesionální měřicí technikou používanou v praxi provedeno opakované měření vibrací na frézce. Měření obsahuje tři části a to měření samobuzeného kmitání při obrábění, dále měření obrábění pomocí nevyváženého a vyváženého nástroje. Na základě těchto naměřených hodnot pak bude provedena analýza vibrací pomocí frekvenční charakteristiky a následné zhodnocení efektivity a použitelnosti metody v praxi.

2 MIKROFONY

Mikrofon je elektroakustický měnič nebo snímač převádějící zvuk na elektrický signál. Jakožto první člen v elektroakustickém řetězci má zásadní vliv na výslednou kvalitu signálu. Mikrofony jsou využívány v mnoha zařízeních, jako jsou například mobilní telefony, magnetofony, naslouchátka atd. [1]

2.1 Princip činnosti mikrofону

Akustický signál se projevuje změnami akustického tlaku a rozechvívá mechanický systém – membránu. Tento pohyb je snímán elektromechanickým měničem. Pokud akustický tlak působí na jednu stranu membrány, jedná se o tlakové mikrofony. V tomto případě amplituda membrány nezávisí na směru ani vzdálenosti zdroje, ale pouze na akustickém tlaku. Pokud je akustický signál přiváděn i na zadní stranu membrány, jedná se o gradientní mikrofony. V tomto případě výchylka membrány nezávisí na velikosti akustického tlaku, ale na rozdílu akustického tlaku před a za membránou. Velikost výstupního signálu u tohoto druhu mikrofónů je závislá na poloměru zakřivení akustické vlnoplochy. Čím větší je zakřivení vlnoplochy, tím menší je poloměr, tedy bližší akustický zdroj a tím větší výstupní signál. Gradientní mikrofony se využívají především pro snímání akustického signálu v nahrávacích studiích. [1]

2.2 Technické parametry mikrofónů

2.2.1 Citlivost mikrofonu

Citlivost mikrofonu je vyjádřena jako poměr výstupního napětí mikrofonu a akustického tlaku, které toto napětí vybudilo. Udává se v jednotkách $V \cdot Pa^{-1}$. Jelikož je tato veličina závislá na frekvenci, můžeme se setkat s jejím vyjádřením i v jednotkách dB. [2]

2.2.2 Šum mikrofonu

Šum mikrofonu je definován jako poměr výstupního napětí mikrofonu vyvolaného akustickým tlakem 1 Pa a výstupního napětí mikrofonu, který je umístěn v dokonale tichém prostředí. Vlastní šum způsobují například vlastní elektrické obvody nebo tepelný pohyb molekul vzduchu, který rozkmitává membránu. [2]

2.2.3 Impedance mikrofonu

Impedancí mikrofonu je myšlena hodnota impedance naměřená na výstupních svorkách. Při zapojení mikrofonu se zesilovačem by měla mít impedance zesilovače nejlépe pětikrát až desetkrát větší hodnotu než je impedance mikrofonu. V případě nevyhovující vstupní impedance může dojít k nežádoucím jevům, jako je např. zkreslení frekvenční charakteristiky. [2]

2.2.4 Frekvenční charakteristika

Frekvenční charakteristika udává závislost výstupního napětí mikrofonu na frekvenci při konstantním akustickém tlaku. Pro kvalitní záznam by odchylka od rovnoměrné charakteristiky v rozsahu 40 až 15000 Hz neměla být větší než 5 dB. [2]

2.2.5 Maximální SPL

Maximální SPL, tedy Maximal Sound Pressure Level, vyjadřuje hodnotu maximálního akustického tlaku, kterou daný snímač zvládne zpracovat bez zkreslení. Tato charakteristika je udávána v dB. [3]

2.2.6 Fantomové napájení

Fantomové napájení se využívá v případě použití kondenzátorových mikrofonů. Tento typ má v sobě zabudovaný předzesilovač, který ke svému fungování potřebuje napájení. [4]

2.3 Směrová charakteristika

Směrová charakteristika je speciálním parametrem mikrofonu a velmi ovlivňuje jeho další vlastnosti a využití, proto je vhodné ji uvést jako speciální kapitolu. Tato charakteristika vyjadřuje závislost citlivosti mikrofonu na úhlu, který svírá akustická osa mikrofonu s osou akustického zdroje, což je znázorněno na obrázku 1). Nízká kvalita obrázku je dána zdrojem. U rotačně symetrických mikrofonů bývá akustická osa většinou osou geometrickou, v ostatních případech je určena výrobcem. Směrová charakteristika se mění v závislosti na frekvenci, proto vždy bývá udávána pro určitý kmitočet. Gradientní mikrofony jsou směrové a nabývají proto následujících charakteristik. [2] Jejich znázornění je zobrazeno na obrázku 2), jehož kvalita je dána zdrojem.



Obr. 1) Akustická osa a směrová charakteristika [2]

2.3.1 Kulová směrová charakteristika

Kulová, nebo také všesměrová směrová charakteristika je typická pro tlakové mikrofony, které se vyznačují tím, že jsou při frekvencích od 40 do 8000 Hz všesměrové, tudíž je jejich citlivost v tomto pásmu pro všechny směry stejná. Mikrofon zde přijímá zvuk ze všech stran ve stejné kvalitě a intenzitě. [2]

2.3.2 Ledvinová směrová charakteristika

Ledvinová směrová charakteristika se též nazývá jako kardioidní a zajišťuje nejsilnější snímání zvuku před mikrofonem a zároveň potlačuje okolní ruchy. Díky těmto vlastnostem je vhodný pro zpěváky na živé vystupování. Tuto směrovou charakteristiku můžeme najít např. u dynamického mikrofonu Shure SM58. [5]

2.3.3 Kuželová směrová charakteristika

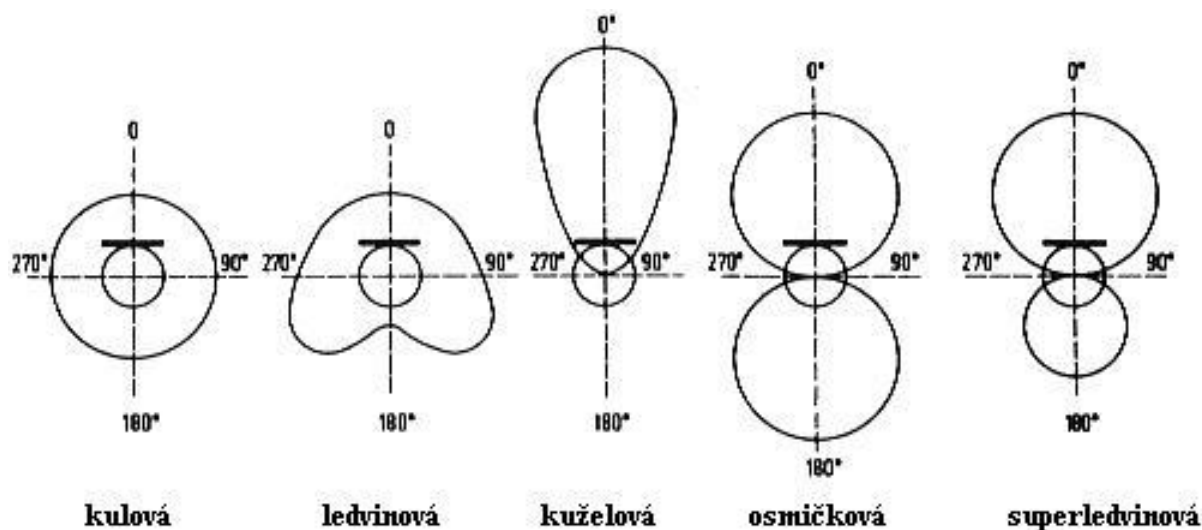
Kuželová směrová charakteristika je charakteristická pro směrové mikrofony. Ty se vyznačují tím, že snímají zvuk výhradně z určitého směru. [5]

2.3.4 Osmičková směrová charakteristika

V literatuře ji můžeme najít též pod názvem bidirekcionální. V případě osmičkové směrové charakteristiky je zvuk ze stran potlačen. Je tedy dosažena tím, že je umožněn přístup zvuku k membráně pouze zepředu a zezadu. [5]

2.3.5 Superledvinová směrová charakteristika

Superledvinová, nebo-li hyperkardioidní směrová charakteristika má podobné vlastnosti jako ledvinová pouze s tím rozdílem, že snímá zvuk ve větším rozsahu. [2]



Obr. 2) Směrové charakteristiky [5]

2.4 Rozdělení mikrofonů podle konstrukce

2.4.1 Uhlíkový mikrofon

Uhlíkový mikrofon je založený na principu toho, že uhlíková zrnka, která jsou stlačena mezi kovovými deskami, mají elektrický odpor nepřímo úměrný tlaku. V případě, že na desku působí zvukové vlnění, dojde ke změně proudu, který protéká mezi deskami. Tento typ mikrofonu se používal nejčastěji jako telefonní mikrofonní vložka. V současné době je ovšem v telefonii nahrazen jiným druhem MEMS mikrofonů. [6]

2.4.2 Elektrodynamický mikrofon

Elektrodynamický mikrofon se vyrábí ve dvojím provedení a to jako mikrofon cívkový, nebo mikrofon páskový. Tyto mikrofony jsou díky svým vlastnostem nejčastěji využívány jako pódiové mikrofony pro živé hraní.

Cívkový elektrodynamický mikrofon

Cívka spojená s membránou, která ji rozkmitává, se pohybuje v magnetickém poli permanentního magnetu. Podle jakosti zde bývá rozdíl ve vinutí cívky. Citlivost tohoto druhu mikrofonu se dá upravit pomocným vinutím na vnější straně magnetického obvodu, které je zapojeno tak, aby se rušila indukovaná napětí na obou cívkách.

Páskový elektrodynamický mikrofon

Jedná se o nejjednodušší typ elektrodynamického mikrofonu. Elektromechanický měnič zde tvoří zvlněný hliníkový pásek v magnetickém poli. Impedance tohoto pásku je ovšem velmi malá, proto musí být v mikrofonu zabudován i přízpusobovací transformátor. [6]

2.4.3 Piezoelektrický mikrofon

Tento typ mikrofonu pracuje na principu piezoelektrického jevu, při kterém v případě mechanické deformace krystalů některých látek dojde ke vzniku elektrického signálu. Existuje buď bezmembránové, nebo membránové provedení. U bezmembránového zvuk působí přímo na výbrus krystalu, zatímco u membránového je kmitání membrány přenášeno na krystal mechanicky. Tento typ je v dnešní době již nahrazován jinými druhy mikrofonů, ale stále se používá v některých typech snímačů u hudebních nástrojů. [6]

2.4.4 Elektromagnetický mikrofon

Tento druh mikrofonu spadá mezi rychlostní snímače. Dochází zde ke změně magnetického toku protékajícího kotvou (membránou), které indukuje napětí na cívce, která tuto kotvu obklopuje. Nejčastěji se využívá ve sluchadlech pro nedoslýchavé. [6]

2.4.5 Elektrostatický kondenzátorový mikrofon

Kondenzátorové mikrofony se vyrábí v různém provedení. Nejčastěji je tento typ měniče tvořen dvěma elektrodami, pevnou perforovanou elektrodou a pohyblivou elektrodou tvořící membránu, mezi nimiž je stejnosměrné polarizační napětí. Při pohybu membrány dojde ke změně kapacity mezi elektrodami. Signál bývá zesilován předzesilovačem, který je většinou zabudován v korpusu mikrofonu. Kondenzátorový mikrofon potřebuje vysoké polarizační napětí, což je ve většině případů řešeno fantomovým napájením. V tomto případě je polarizačního napětí dosaženo interním měničem. Tyto typy mikrofonů vynikají svými elektroakustickými vlastnostmi, proto jsou využívány v hudebním průmyslu pro nahrávání, nebo pro měřicí účely. [6]

2.4.6 Elektretový mikrofon

Jedná se o speciální typ kondenzátorového mikrofону. Polarizace je zde dosaženo vrstvou elektretu, tedy permanentně polarizovaným tělesem. V mikrofonní kapsli bývá přímo zabudován i předzesilovač o vysokém vstupním odporu FET. Díky těmto charakteristikám je možné dosáhnout menších rozměrů oproti kondenzátorovým mikrofونům a přitom nedojde ke snížení kvality záznamu zvuku. Díky těmto vlastnostem byly dříve široce využívány v telefonii. Nyní se s nimi můžeme setkat např. v měřicích přístrojích nebo v mikrofonních vložkách v počítačích. [6]

3 MIKROFONY V MOBILNÍCH TELEFONECH

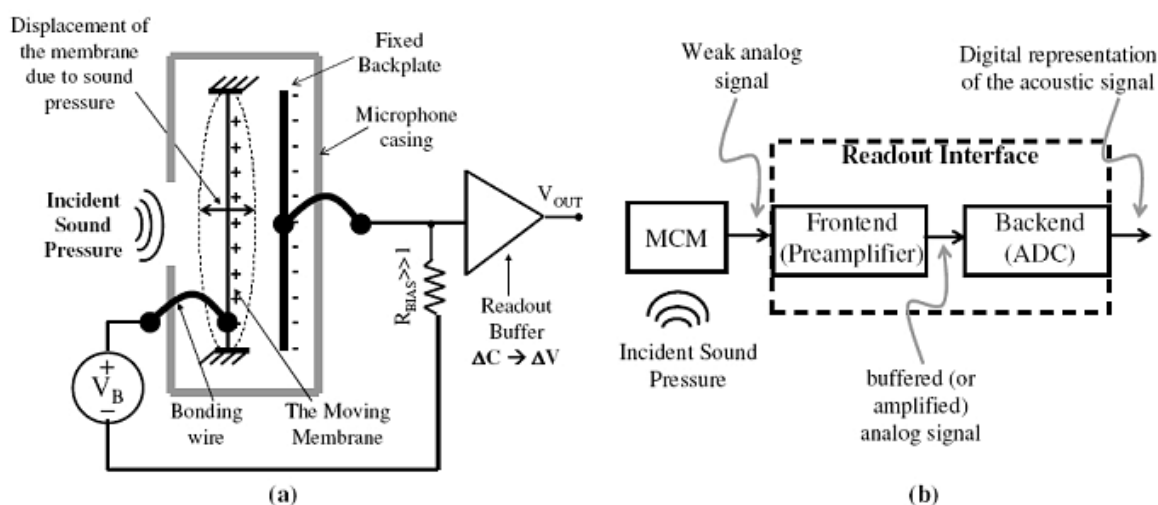
Jak již bylo zmíněno výše, dříve byly v mobilních telefonech několik desetiletí využívány elektretové mikrofony. Zvyšující se požadavky na velikost a funkci ale zapříčinily nahrazení těchto mikrofonů jejich nástupci v podobě speciálního typu miniaturních mikrofonů vyráběných technologií MEMS. [8]

3.1 MEMS mikrofony

Tento typ křemíkových mikrofonů se vyrábí v podobě CMOS čipu, tedy integrované součástky, která zajišťuje jednoduchou strukturu logických členů a dosažení vysoké hustoty prvků na čipu.[7] Tato součástka se skládá z citlivé křemíkové membrány, která je upevněna na křemíkovém čipu. Tlak působící na membránu zde způsobuje změnu kapacity. Jedná se tedy o kapacitní mikrofón, který můžeme dále označovat jako MCM – MEMS Capacitive Microphone. Dále čip obsahuje předzesilovač, pomocné obvody v podobě filtrů a A/D převodník. Filtrům v soudobých mobilních telefonech se kvůli jejich možnému vlivu na měření vibrací budu věnovat více později. Výsledný mikrofón dosahuje velikosti pouze několika milimetrů, většinou 3x3x1 mm. [8]

3.2 Struktura MCM

Základem MCM je elektroakustický měnič sloužící ke zpracování zvuku, který se projevuje změnami akustického tlaku. Tento měnič je složen ze dvou elektrod. Pevná elektroda se nachází na čipu v podobě pevné perforované membrány a pohyblivá elektroda je umístěna na pohyblivé membráně. Skrz perforovanou membránu prochází akustický tlak na membránu snímající, kde způsobuje její vibrace. Tento pohyb zapříčiňuje změnu mezery mezi elektrodami a tím pádem i změnu kapacity vzduchového kondenzátoru. Změna kapacity je ihned zpracována a převedena na základní analogový signál, který může být dále upraven dalšími již výše zmíněnými obvody. Celá snímající část je kryta mikrofonním pouzdrem.



Obr. 3) a) Schéma MCM
b) MCM s A/D převodníkem [8]

Tento typ elektroakustického měniče může být uměle ovlivňován polarizačním napětím V_B , jak je tomu i na obrázku a), kde je znázorněna bloková struktura MCM složená z elektroakustického měniče a převodníku. Díky této polarizaci je možné měnit snímací citlivost mikrofonu. [8]

Dle stránek výrobců MCM je možné si navolit spoustu parametrů, ale mezi nejběžnější specifikace mikrofonů používaných v současných mobilních telefonech spadá plochá frekvenční charakteristika v rozmezí 100 – 15000 Hz, citlivost – 18 až – 46 dB a SNR, tedy odstup signálu od šumu, přes 60 dB. [9]

3.3 AKU143

Za zástupce mikrofonů v současných telefonech považuji mikrofon AKU143 od firmy Akustica. Jedná se o klasický MEMS mikrofon s podrobnou charakteristikou uvedenou v tabulce 1). [10]

Tab 1) Parametry MEMS mikrofonu AKU143 [10]

Výrobce:	Akustica
Kategorie produktu:	Mikrofony MEMS
Citlivost:	- 42 dB
Tolerance:	1 dB
SNR:	65 dB
Impedance:	200 Ω
Frekvenční rozsah:	50 Hz – 11,5 kHz
Provozní napájecí proud:	155 μ A
Provozní napájecí napětí:	3,6 V
Minimální provozní teplota:	- 40 °C
Maximální provozní teplota:	85 °C
Typ výstupu:	Analog
Typ portu:	Top
Délka:	3,76 mm
Šířka:	2,95 mm
Hloubka:	1,1 mm
Směrová charakteristika:	Všesměrová
Hladina akustického tlaku:	126 dB
Styl koncovky:	SMD/SMT
Tvar:	Obdélníkový

3.4 Filtry v mobilních telefonech

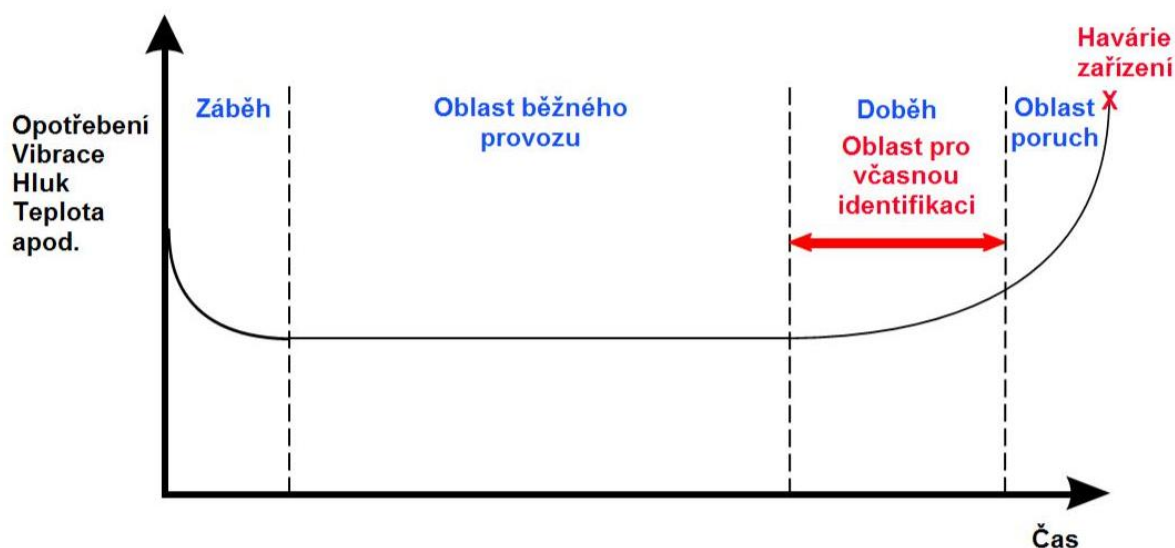
Jak již bylo zmíněno v kapitole o MEMS mikrofonech, mohou se v mobilních telefonech vyskytovat na čipu v zapojení s mikrofonom v podobě pomocných obvodů i filtry, které mají za úkol odstraňovat nežádoucí hluk a zvyšovat tím tak kvalitu zaznamenaného zvuku. V případě běžně využívaných mobilních telefonů se ale přímo na čipu žádné filtry nevyskytují a záznam zvuku tím pádem probíhá bez složité filtrace. Filtrace zvuku může být dosaženo až v případě použití software, který zaznamenaný signál zpracovává. Další možnost výskytu filtrace zvuku v mobilních telefonech nastává při přenosu zvukového signálu přes GSM síť, tedy při uskutečňování telefonického hovoru. V tomto případě je zde uskutečněna filtrace už při kódování zdroje, kdy při převodu spojitého signálu na nespojitý dochází k odstranění zbytečných kmitočtů, čímž je dosaženo snížení datového toku. Metoda k tomuto používaná je ovšem složitá a není obsahem mé bakalářské práce, proto ji zde nebudu blíže rozebírat. [11]

Filtrací zvuku se bylo potřeba zabývat hlavně kvůli možnosti odfiltrování měřených poruch. V případě zabudovaných filtrů by mohl mobilní telefon vyhodnotit zvukové projevy vyhodnocovaných poruch stroje jako hluk a tím pádem je při úpravě zvuku odstranit. Bez těchto filtrů nám může měření ovlivnit pouze pásmová propustnost, která je charakteristikou každého mikrofonu, v našem případě 50 – 11500 Hz.

4 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Pro správný chod strojních zařízení v oblasti bezpečnosti, ekonomiky i ekologie je potřeba předcházet vznikajícím závadám. K jejich včasné identifikaci slouží právě metody technické diagnostiky. Díky brzkému odhalení je možné technologické závady včas odstranit a zabránit tím tak narušení bezpečnosti provozu a škodám na zařízení.

Poruchy strojních zařízení se projevují více způsoby, mezi které patří např. změna teploty a vibrací, hluk a opotřebení stroje. Projev těchto poruch v závislosti na čase je znázorněn na obrázku 4). K účelu detekce poruch slouží řada diagnostických metod, které bývají často kombinovány, aby byl výsledek měření co nejpřesnější. Mezi základní metody technické diagnostiky se řadí vibrodiagnostika, tribodiagnostika, termodiagnostika, akustická diagnostika a elektrodiagnostika.



Obr. 4) Vanová křivka průběhu opotřebení [12]

Vibrodiagnostika a akustická diagnostika jsou velmi blízké metody technické diagnostiky. Vibrodiagnostika je založena na vyhodnocování stavu stroje pomocí vibračního signálu. Díky vibračním měřením objektu dochází k pohybu částic vzduchu a tím ke vzniku hluku, kterým se následně zabývá akustická diagnostika. Za hluk považujeme zvukový projev ve frekvenčním pásmu 20 – 20000 Hz. Akustická diagnostika se věnuje tedy akustické emisi, ale také pozoruje působení hluku na lidský organismus. Nadále se budu zabývat tedy hlavně vibrodiagnostikou a jejími akustickými projevy. [12]

4.1 Vibrodiagnostika

U každého pohyblivého zařízení vznikají za jeho provozu vibrace, které odpovídají jeho technickému stavu. Sledováním těchto vibrací je tedy možné včas detekovat vznikající závady stroje. Hlavní veličiny pro měření a analýzu vibračního signálu jsou rychlost, zrychlení a výchylka vibrací. [12]

4.1.1 Základní veličiny

Okamžitá výchylka [mm]:

$$x = X_{max} * \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = X_{max} * \sin(\omega t) \quad (1)$$

X_{max} je amplituda výchylky [mm]

T je perioda [s]

t je čas [s]

ω je úhlová frekvence [rad/s]

Okamžitá rychlost [mm/s]:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega * X_{max} * \cos(\omega t) = V_{max} * \cos(\omega t) = V_{max} * \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

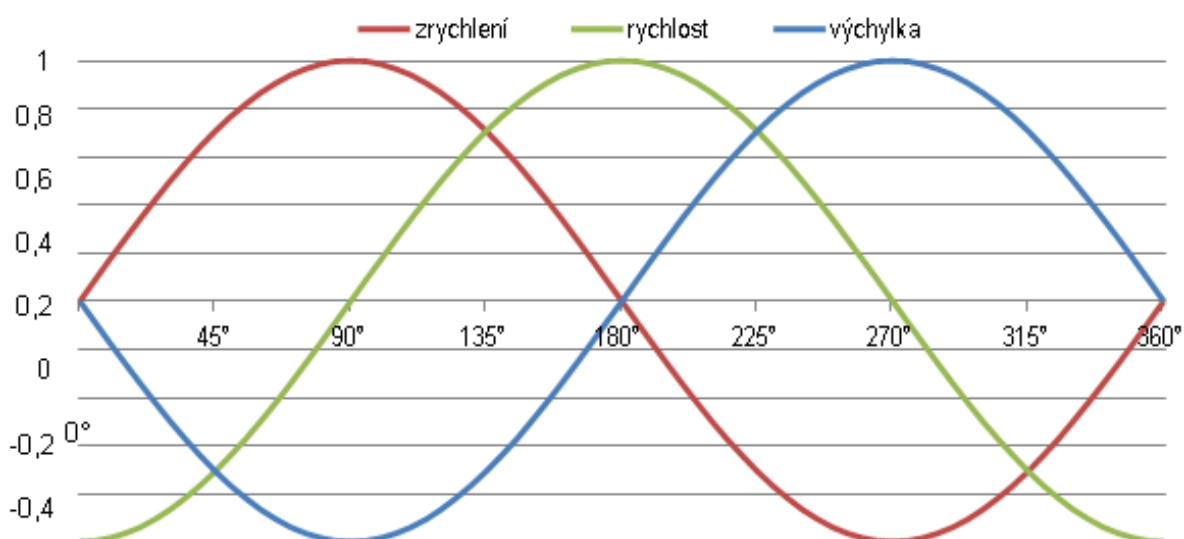
V_{max} je maximální amplituda rychlosti [mm/s]

Okamžité zrychlení [mm/s²]:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 * X_{max} * \sin(\omega t) = -A_{max} * \sin(\omega t) \quad (3)$$

A_{max} je maximální amplituda zrychlení [mm/s²]

Z konečných upravených vztahů je možné vyčíst fázové rozdíly mezi jednotlivými průběhy těchto veličin. Jejich fázové porovnání je znázorněno na obrázku 5). [12]



Obr. 5) Fázové porovnání základních veličin [12]

4.2 Vliv poruch na základní veličiny

Různé poruchy se projevují změnami různých veličin. Na změnu rychlosti vibrací mají vliv poruchy projevující se v nízkých a středních frekvencích. Využívá se zde tedy nejčastěji frekvenční pásmo 10 – 1000 Hz, ve kterém je možno zaznamenat např. vliv nesouososti, nevyváženosti a uvolnění. Na vysokých frekvencích se projevují zpravidla změny zrychlení vibrací, které bývají způsobovány např. závadami ložisek, mazání a převodů. Výchylka vibrací je ze základních veličin používána nejméně a slouží třeba ke kontrole technického stavu turbín. [12]

4.3 Snímače vibrací

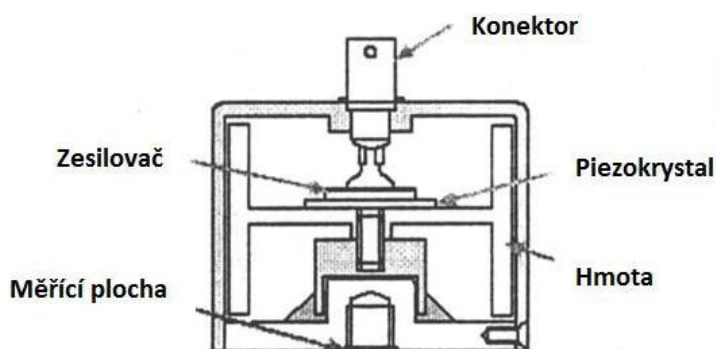
Snímače vibrací jsou používány pro zaznamenávání mechanického kmitání převodem na elektrickou veličinu. Naměřené hodnoty jsou dále zesilovány a zpracovávány. Existuje široké spektrum snímačů vibrací, kvůli využití v rozdílných podmínkách a různým aplikacím. Rozdíly bývají nejenom v parametrech snímačů, jako je přesnost, rozsah a citlivost, ale také v měřené veličině a v ceně.

Mezi základní druhy snímačů patří seismická zařízení a snímače relativní výchylky. Seismická zařízení se upevňují přímo na povrch konstrukce stroje a snímají její absolutní vibrace, zato snímače relativní výchylky měří relativní výchylku vibrací mezi rotujícími a nerotujícími částmi stroje. [12]

4.3.1 Akcelerometry

Pro další rozdělení snímačů se používá rozdělení podle měřené veličiny. Dělí se na snímače výchylky, rychlosti a zrychlení. Akcelerometry se používají k měření zrychlení a díky své praktičnosti jsou nejvyužívanějším druhem snímačů vibrací. Zbylé dva typy měřičů jsou využívány minimálně a to většinou pouze pro speciální účely. V případě potřeby výstupních hodnot v podobě rychlosti nebo výchylky lze naměřené hodnoty z akcelometru početně převést.

Akcelerometry patří do skupiny seismických zařízení. Jejich praktičnost spočívá hlavně v jednoduché konstrukci, která se odráží v nízké ceně. Tyto snímače fungují na principu piezoelektrického jevu, který byl popsán již u piezoelektrických mikrofónů. Vyhodnocovaný elektrický náboj je zde úměrný síle působící na stěnu piezoelektrického krystalu, a jelikož se hmotnost snímače nemění, je tedy úměrný zároveň i zrychlení. Pomocí hmotnosti lze regulovat i frekvenční rozsah a citlivost akcelometru. Při zvýšení seismické hmotnosti dochází ke zmenšení frekvenčního rozsahu, ale zato ke zvýšení citlivosti. Akcelerometry se dále dělí podle směru působící síly na ohybové, smykové a tlakové. [12]



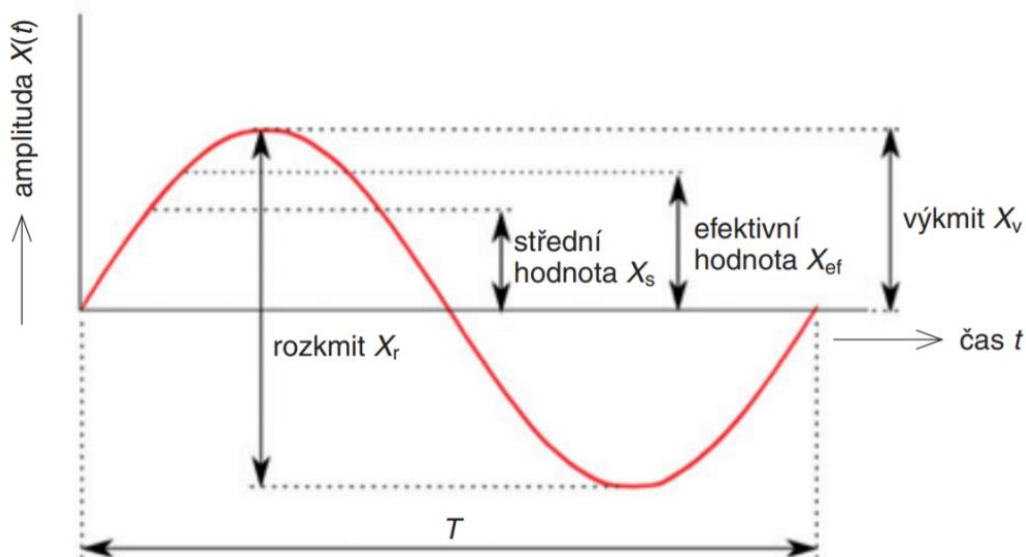
Obr. 6) Tlakový akcelerometr [12]

4.4 Vyhodnocování vibrací

Zaznamenaný signál je tvořen směsicí signálů o různých frekvencích, které se mění v čase. Můžeme tedy vyhodnocovat vibrace v časové oblasti (time domain analysis) nebo využít analýzu signálu ve frekvenční oblasti (frequency domain analysis). K převodu signálu z časové domény do frekvenční slouží metoda zvaná spektrální analýza. [13]

4.4.1 Vyhodnocování vibrací v časové oblasti

Tato metoda vyšetřuje naměřený signál na základě závislosti amplitudy signálu na čase. Pro potřeby hodnocení se zde určuje především rozkmit nebo výkmit, dále střední a efektivní hodnota. Metoda spočívá v tom, že se naměřená hodnota porovná s hodnotami z minulých měření, kdy byl stroj bez poruchy. Tato metoda patří k jednodušší a rychlejší variantě vibrodiagnostiky, zároveň ale není tak přesná. Kvůli nedostatkům této metody, jako je např. nemožnost lokalizace příčiny poruchy, se tedy využívá zpravidla pouze k informativnímu určení stavu stroje. Pro důkladnější posouzení stavu pak slouží právě frekvenční analýza. [13]

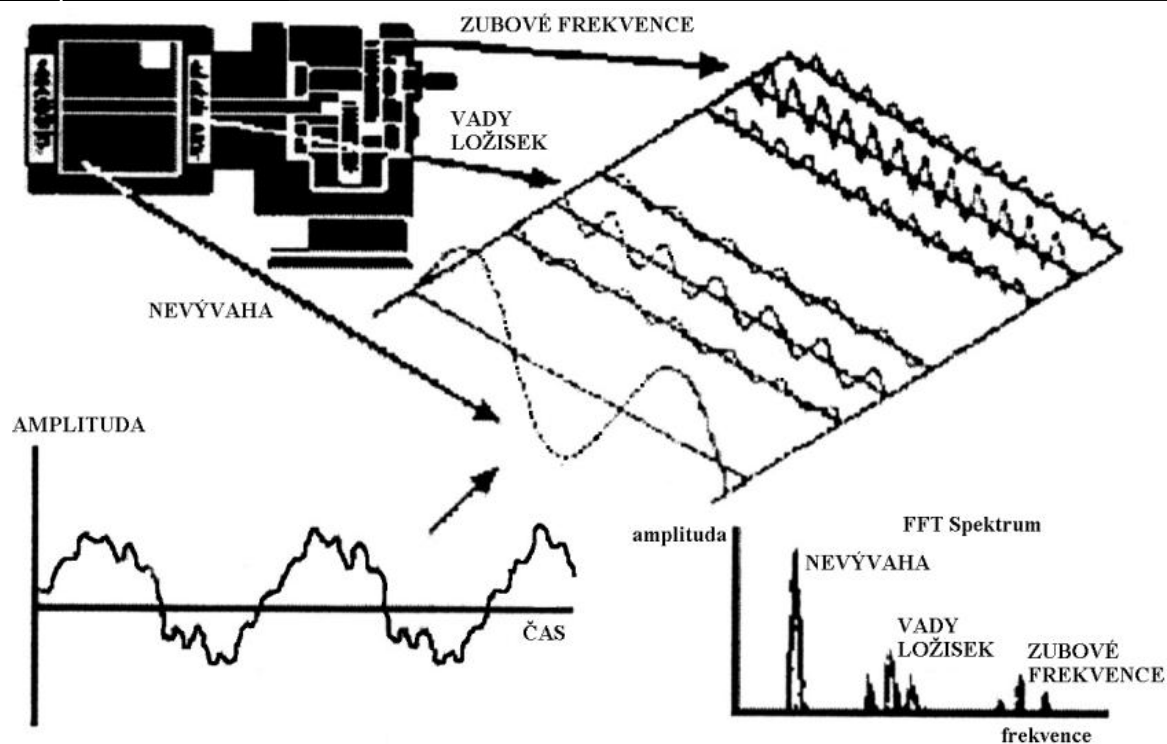


Obr. 7) Hodnotící parametry časového průběhu signálu [13]

4.4.2 Analýza signálu ve frekvenční oblasti

Frekvenční analýza vyšetřuje závislost amplitudy signálu na frekvenci, díky čemuž můžeme lokalizovat jednotlivé jevy. Tato metoda je založena především na diskrétní Fourierově transformaci DFT (Discrete Fourier Transform) a rychlé Fourierově transformaci FFT (Fast Fourier Transform). Naměřený signál proměnný v čase je jejich pomocí dále zpracováván numericky.

Nejpoužívanější metodou při frekvenční analýze je rychlá Fourierova transformace. FFT dokáže v signálu vyhledat opakující se děje, které je následně schopná vyhodnotit a zobrazit ve frekvenčním spektru s příslušnou frekvencí. Frekvenčním spektrem se v tomto případě rozumí rozklad časového signálu na množství sinusových signálů s odpovídající počáteční fází a amplitudou. Posouzení rozdílu mezi vyhodnocováním vibrací v časové a frekvenční oblasti je znázorněno na obrázku 8), na kterém je zobrazen vliv nevyváženosti, poruchy ložiska a zubového převodu. [13]



Obr. 8) Projevy poruch na vyhodnocování vibrací [12]

5 MĚŘENÍ

Z rešeršní části bakalářské práce vyplývá, že by měření vibrací pomocí mikrofону mobilního telefonu mělo být možné, což mělo být v praktické části ověřeno frekvenční analýzou. Měření probíhalo na frézce při obrábění, kde byly snímány vibrace pomocí běžného mobilního telefonu. Pro srovnání s ostatní měřicí technikou byl použit akcelerometr s měřicí kartou NI 9234. Veškeré měření se řídilo pravidly z knihy Meranie technických veličín. [16]

5.1 Použitý SW

5.1.1 Signalexpress 2017

Pro sejmutí dat akcelerometru byl využit Signalexpress 2017 od National Instruments. Tento interaktivní software slouží k záznamu dat z různých zařízení a přístrojů a k jejich následné analýze bez nutnosti programování. Výsledná data byla vyexportována ve formátu LVM. [14]

5.1.2 Hi-Res Audio Recorder

Pro záznam dat z mikrofónu mobilního telefonu byl použit Hi-Res Audio Recorder od firmy StereoMatch. Jedná se o vysoce kvalitní hlasový záznamník s možností volby výsledného formátu, vzorkovací frekvence a různých efektů. Pro naše měření bylo využito formátu WAV a vzorkovací frekvence 48000 Hz. [15]

5.1.3 MATLAB

Následné zpracování dat probíhalo v programu MATLAB. Pro potřeby vyhodnocování zde byly vytvořeny programy pro zpracovávání LVM a WAV souborů.

V případě analýzy LVM souborů bylo nejdříve využito programu Excel, ve kterém byla pro zjednodušení následného zpracování odstraněna hlavička a soubory byly převedeny do formátu XLSX, ve kterém byly posléze importovány do MATLABu. V první části kódu pro výslednou analýzu byly zapsány údaje z hlavičky, jako je například vzorkovací perioda.

Pro analýzu WAV souboru bylo v první části kódu využito předem naprogramovaných funkcí. Pro import dat a zjištění vzorkovací frekvence byla využita funkce audioread, pro další informace o souboru funkce audioinfo.

Druhá část kódu byla pro zpracování dat z mikrofónu a akcelerometru stejná. Zde byla pro zhotovení frekvenční analýzy použita funkce fft, která využívá algoritmu rychlé Fourierovy transformace. Vykreslení grafů bylo dosaženo funkcí plot.

5.2 Průběh měření

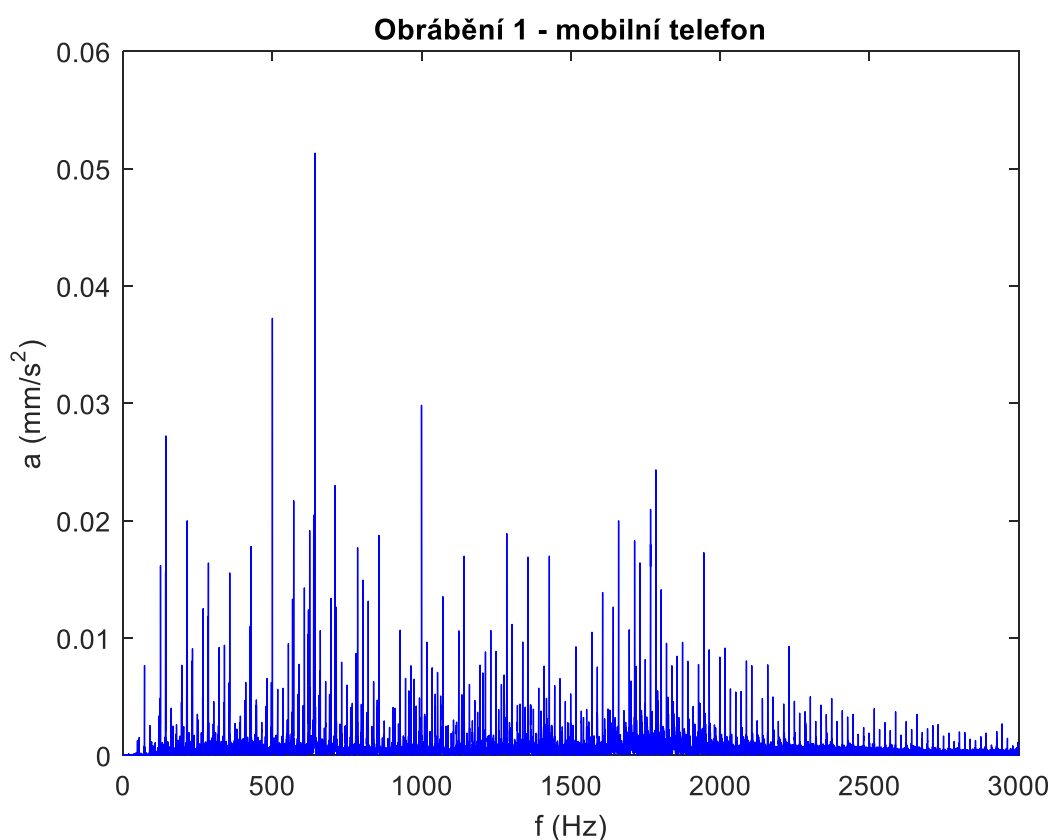
Nejdříve bylo provedeno opakované měření vzniku samobuzeného kmitání při obrábění, tzv. chatter. Toto měření sloužilo pouze pro ukázkou zpracování naměřeného signálu.

Dále bylo provedeno měření nevyváženosti, které bylo dosaženo odebráním dvou destiček z frézy s vyměnitelnými destičkami. Výsledná frekvenční analýza byla následně porovnána s výsledky měření vyváženého nástroje.

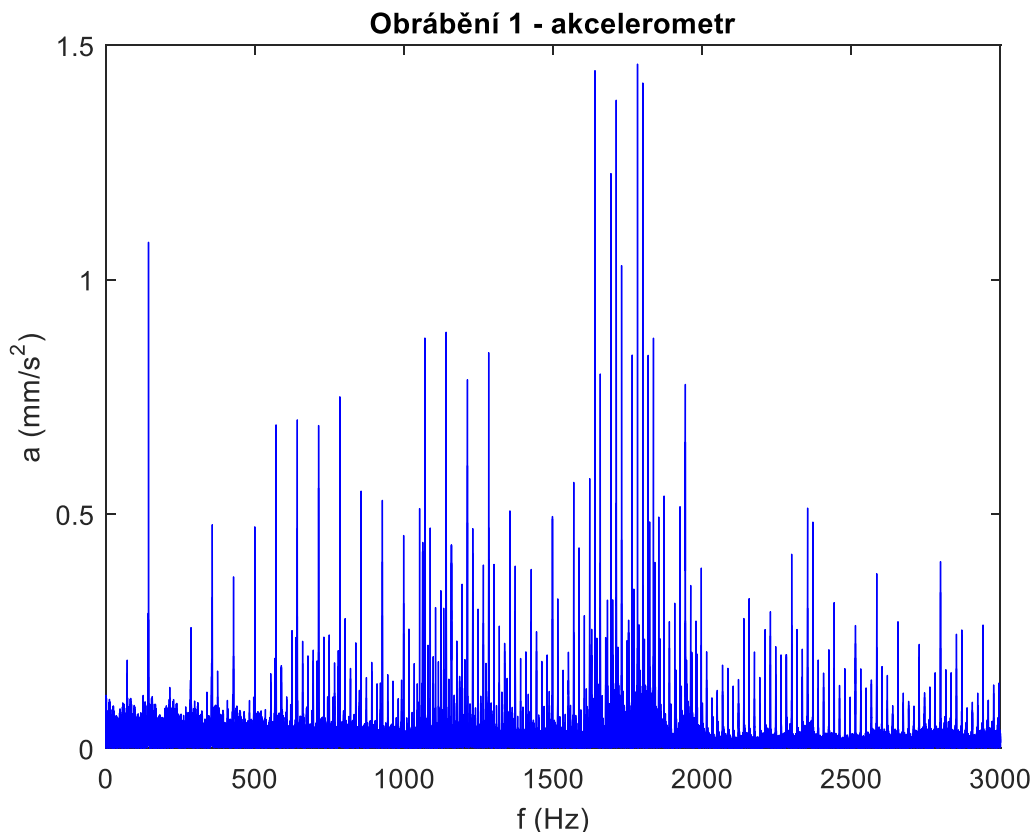
5.3 Zpracování dat

5.3.1 Projev obrábění

Pro ukázkou zpracování signálu z mikrofonu mobilního telefonu a akcelerometru byly vybrány následující grafy. V případě akcelerometru byly frekvenční charakteristiky všech os vloženy pro názornost do jednoho grafu.



Obr. 9) Frekvenční analýza signálu z mobilního telefonu

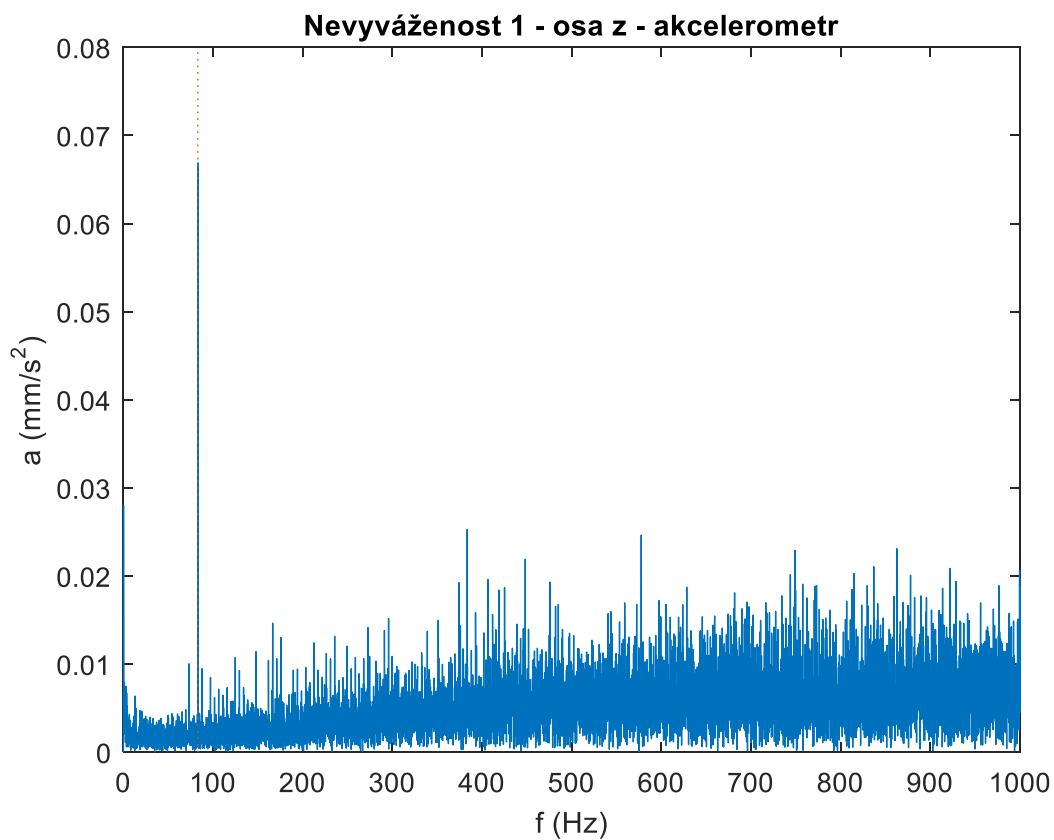


Obr. 10) Frekvenční analýza signálu z akcelerometru

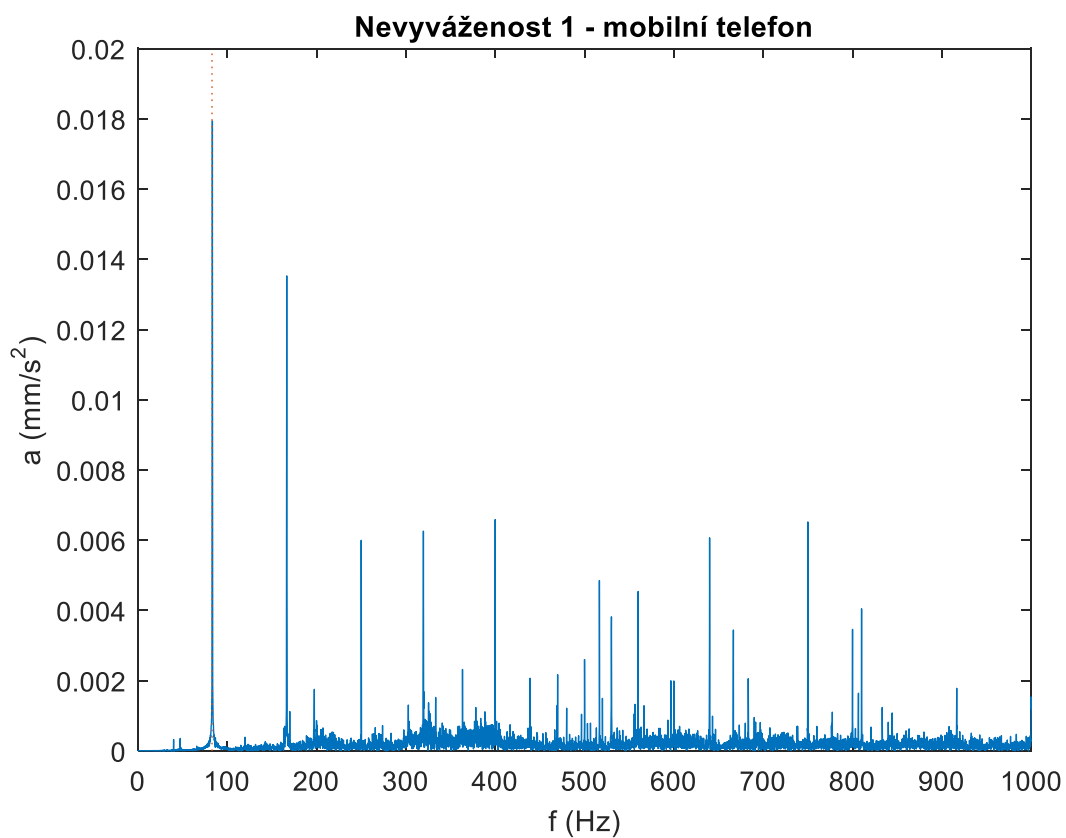
5.3.2 Projev vyváženého a nevyváženého nástroje

Pro vyhodnocení účinnosti metody byly zhotoveny grafy pro obrábění vyváženým a nevyváženým nástrojem. Jak již bylo zmíněno v kapitole o technické diagnostice, nevyváženost se projevuje ve frekvenčním spektru od 10 do 1000 Hz. Efektivitu měření můžeme určit nejenom porovnáním výsledných frekvenčních analýz signálu z mikrofону mobilního telefonu a z akcelerometru, který je pro tento účel využíván, ale hlavně porovnáním grafů pro vyvážený a nevyvážený nástroj.

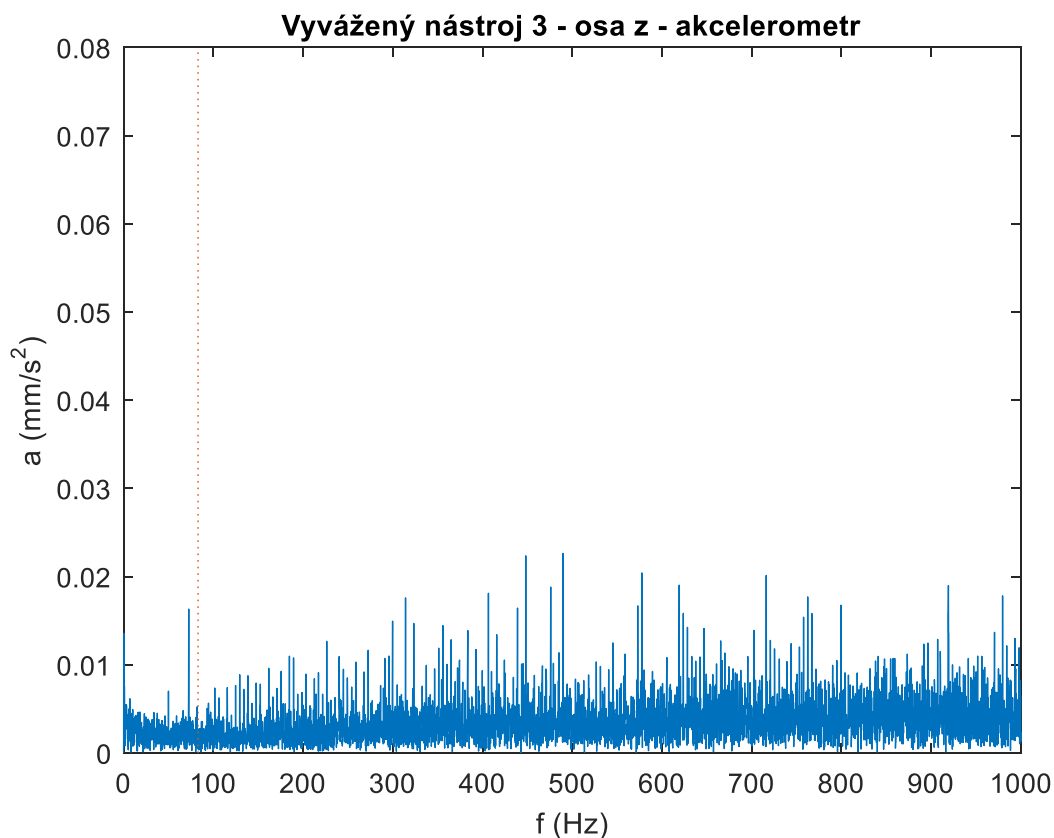
Při vyhodnocování dat pro nevyváženost bylo ze sestavené frekvenční analýzy signálu z akcelerometru zjištěno, že se nevyváženost projevuje první harmonickou frekvencí na 83 Hz. Tato frekvence byla stanovena na základě otáček stroje ($5000 \text{ ot/min} = 83,33 \text{ Hz}$). Proto je v následujících grafech tato frekvence speciálně označena. Zároveň je pro ukázkou naměřených dat z akcelerometru použita pouze osa z, jelikož se na ní vibrace projevovaly nejvíce.



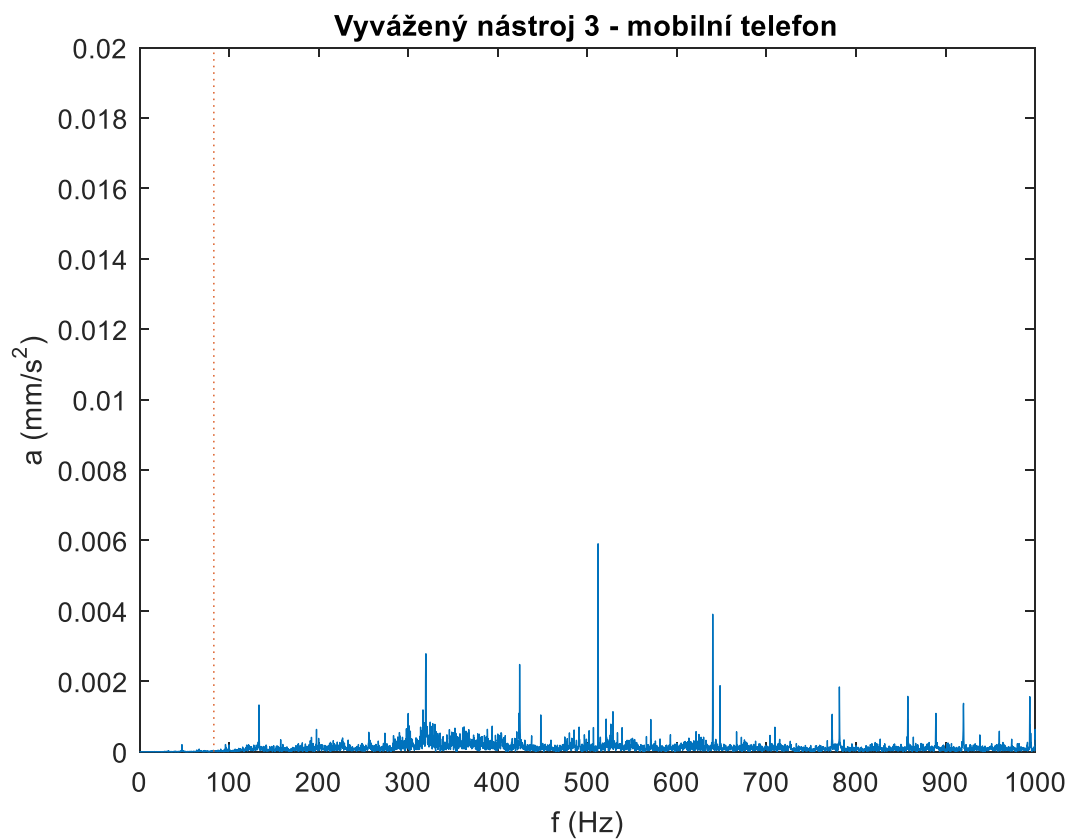
Obr. 11) Frekvenční analýza nevyváženého nástroje – akcelerometr



Obr. 12) Frekvenční analýza nevyváženého nástroje – mikrofon mobilního telefonu



Obr. 13) Frekvenční analýza vyváženého nástroje – akcelerometr



Obr. 14) Frekvenční analýza vyváženého nástroje – mikrofon mobilního telefonu

6 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Bakalářská práce pojednávala o možnosti využití záznamu signálu z mikrofonu mobilního telefonu pro vibrodiagnostiku. Rešeršní část práce posloužila k obeznámení s problematikou mikrofónů, se záznamem zvuku pomocí mobilního telefonu a s technickou diagnostikou. Na základě těchto poznatků pak bylo navrženo měření, které mělo zadanou metodu ověřit.

V našem experimentu vykazovalo měření dobré výsledky a má smysl tuto metodu podrobit dalším experimentům. Její efektivita byla potvrzena právě při měření obrábění nevyváženým a vyváženým nástrojem. Pro tento druh poruchy lze tedy metodu zatím považovat za použitelnou alespoň pro informativní určení stavu stroje. Nevýhody této metody jsou rozhodně menší nepřesnosti, které ale při zaznamenávání nevyváženosti nemají velký vliv, dále pak nemožnost rozeznání vibrací v jednotlivých osách, jak je tomu u akcelerometru.

7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo sjednotit informace o mikrofonech všeobecně a sepsat poznatky o možnostech záznamu zvuku přes mikrofon mobilního telefonu. V této části byla teoreticky odůvodněna možnost využití naměřeného signálu k analýze vibrací, jelikož nebylo zjištěno žádné závažné omezení např. parametry mikrofону nebo možnými filtry.

Další značná část byla věnována technické diagnostice, která pojednávala o různých metodách měření a zpracování dat a jejich následné analýze. V podkapitole o vibrodiagnostice byly zmíněny i projevy poruch na frekvenční analýzu, která byla následně zpracována v praktické části.

Samotné měření probíhalo na frézce a byly pro něj vybrány projevy samobuzeného kmitání při obrábění a projevy nevyváženého a vyváženého nástroje. Signál byl zaznamenáván akcelerometrem a mikrofonom mobilního telefonu a následně byl zpracován v programu MATLAB. Zde byla k provedení frekvenční analýzy aplikována funkce fft, která využívá rychlé Fourierovy transformace. U samobuzeného kmitání sloužily výsledné grafy k porovnání signálu z mikrofonu mobilního telefonu a akcelerometru. Z těchto výsledků vyplynulo, že jsou si frekvenční analýzy signálů z obou měření podobné. Efektivitu měření vibrací mikrofonom mobilního telefonu ovšem potvrdilo až porovnání frekvenčních analýz u vyváženého a nevyváženého nástroje, kdy ve všech případech opakovaného měření byly jasně viditelné rozdíly. Nevyváženost se zde projevovala první harmonickou frekvencí na 83 Hz, která u vyváženého nástroje nebyla pozorována ani v případě měření mikrofonom mobilního telefonu, ani akcelerometrem. Metoda měření vibrací mikrofonom mobilního telefonu v našem případě prokázala dobré vlastnosti a je vhodné tuto metodu podrobit dalším experimentům na různých typech rotačních strojů, jako jsou například ventilátory, čerpadla a podobně.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZDENDA: *Mikrofony* [online]. 13. 1. 1999 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.zdenda.com/1999/01/mikrofony/>
- [2] ENCYKLOPEDIE FYZIKY: *Základní vlastnosti mikrofونů* [online]. 17. 8. 2007 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/378-zakladni-vlastnosti-mikrofonu>
- [3] ADM MAGAZÍN: *Mikrofony* [online]. 5. 4. 2017 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://admmagazin.cz/mikrofony-04-vlastni-sum-a-max-spl/>
- [4] FRONTMAN: *Začínáme s mikrofony* [online]. 30. 11. 2012 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://frontman.cz/zaciname-s-mikrofony>
- [5] ACOUSTIC-ELECTRIC: *Směrová charakteristika mikrofونu* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://nf.duseknet.com/mikrofon05.htm>
- [6] ELEKTROAKUSTIKA: *Konstrukce mikrofونů* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://www.elektroakustika.cz/types_microphones.html
- [7] WIKIPEDIE: *CMOS* [online]. 5. 5. 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/CMOS>
- [8] AUTOMATIZACE: *MEMS mikrofony* [online]. Vojáček, 27. Duben 2010 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mems-mikrofony-obecny-popis-struktury-a-funkce>
- [9] MOUSER ELECTRONICS: *Mikrofony MEMS* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/Search/Refine?FS=TRUE&N=15534334+4292906361>
- [10] MOUSER ELECTRONICS: *AKU143* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Akustika/AKU143?qs=%2Fha2pyFadugw5Fc8wqlNvMTb5BV7IW2gBxnbxWsJayo%3D>
- [11] IDNES: *Principy fungování sítě GSM* [online]. Zandl, 25. srpna 1997 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/mobil/tech-trendy/principy-fungovani-site-gsm.A_970825_0003060_mob_tech
- [12] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky: Teorie a praxe*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [13] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *AUTOMA* [online]. 2010, **16**(1), 32-36 [cit. 2019-05-18]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/mereni-vibraci-ve-vibrodiagnostice-2010_01_40375_5744/
- [14] NATIONAL INSTRUMENTS: *SignalExpress* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/downloads/software-products/download.signalexpress.html>
- [15] GOOGLE PLAY: *Hi-Res Audio Recorder* [online]. 12. února 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.stereomatch.audio.recorder.hires>
- [16] CHUDÝ, Vladimír, Rudolf PALENČÁR, Eva KUREKOVÁ a Martin HALAJ. *MERANIE TECHNICKÝCH VELIČÍN*. Slovenská technická univerzita v Bratislave: STU, 1999. ISBN 80-227-1275-2.

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1 Seznam zkratk a symbolů

Zkratka	Význam	Jednotka
Hz	Hertz	[-]
V	Volt	[-]
Pa	Pascal	[-]
s	Sekunda	[-]
rad	Radián	[-]
SPL	Sound Pressure Level	[dB]
	Hodnota akustického tlaku	
FET	Field-Effect Transistors	[-]
	Tranzistory řízené polem	
MEMS	MikroElectroMechanical Systems	[-]
	Mikroelektromechanický systém	
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor	[-]
	Komplementární polovodič na bázi kovu a oxidu	
MCM	MEMS Capacitive Microphone	[-]
	MEMS kapacitní mikrofony	
A/D	Analogově digitální	[-]
SNR	Signal to Noise Ratio	[dB]
	Odstup signálu od šumu	
Ω	Ohm	[-]
A	Ampér	[-]
V	Volt	[-]
C	Celsius	[-]
mm	Milimetr	[-]
SMD	Surface Mount Device	[-]
	Součástky určené pro povrchovou montáž	
SMT	Surface Mount Technology	[-]
	Povrchová montáž	
GSM	Groupe Spécial Mobile	[-]
x	Okamžitá výchylka	[mm]
X_{\max}	Amplituda výchylky	[mm]
T	Perioda	[s]
t	Čas	[s]

ω	Úhlová frekvence	[rad/s]
v	Okamžitá rychlost	[mm/s]
V_{\max}	Maximální amplituda rychlosti	[mm/s]
a	Okamžité zrychlení	[mm/s ²]
A_{\max}	Maximální amplituda zrychlení	[mm/s ²]
DFT	Discrete Fourier Transform	[-]
	Diskrétní Fourierova transformace	
FFT	Fast Fourier Transform	[-]
	Rychlá Fourierova transformace	
f	Frekvence	[Hz]

9.2 Seznam tabulek

TAB 1) PARAMETRY MEMS MIKROFONU AKU143 [10]	24
---	----

9.3 Seznam obrázků

OBR. 1) AKUSTICKÁ OSA A SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA [2]	18
OBR. 2) SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY [5]	19
OBR. 3) A) SCHÉMA MCM B) MCM S A/D PŘEVODNÍKEM [8]	23
OBR. 4) VANOVA KŘIVKA PRŮBĚHU OPOTŘEBENÍ [12]	27
OBR. 5) FÁZOVÉ POROVNÁNÍ ZÁKLADNÍCH VELIČIN [12]	28
OBR. 6) TLAKOVÝ AKCELEROMETR [12]	29
OBR. 7) HODNOTÍCÍ PARAMETRY ČASOVÉHO PRŮBĚHU SIGNÁLU [13]	30
OBR. 8) PROJEVY PORUCH NA VYHODNOCOVÁNÍ VIBRACÍ [12]	31
OBR. 9) FREKVENČNÍ ANALÝZA SIGNÁLU Z MOBILNÍHO TELEFONU ..	34
OBR. 10) FREKVENČNÍ ANALÝZA SIGNÁLU Z AKCELEROMETRU	35
OBR. 11) FREKVENČNÍ ANALÝZA NEVYVÁŽENÉHO NÁSTROJE – AKCELEROMETR	36
OBR. 12) FREKVENČNÍ ANALÝZA NEVYVÁŽENÉHO NÁSTROJE – MIKROFON MOBILNÍHO TELEFONU	36
OBR. 13) FREKVENČNÍ ANALÝZA VYVÁŽENÉHO NÁSTROJE – AKCELEROMETR	37
OBR. 14) FREKVENČNÍ ANALÝZA VYVÁŽENÉHO NÁSTROJE – MIKROFON MOBILNÍHO TELEFONU	37